גז אידיאלי

קובץ הסבר • לחץ וטמפרטורה, משוואת המצב, המודל הקינטי והחוק הראשון

כיתה י״א | 5 יח״ל | מכינה קדם־אקדמית

אינסוף
פיזיקה • מכניקה

מה תמצאו כאן?

האוויר שסביבנו נראה שקט, אבל הוא בנוי מהמון מולקולות שנעות מהר לכל הכיוונים. בנושא הזה נתאר גז בשני מבטים. במבט מקרוסקופי מודדים לחץ, נפח וטמפרטורה, ומגלים חוק אחד שכל הגזים מצייתים לו, כל עוד הם לא דחוסים מדי: משוואת המצב. במבט מיקרוסקופי מסבירים את החוק הזה בעזרת חוקי ניוטון ומשפט המתקף–תנע, ומגלים מה הטמפרטורה מודדת באמת. בסוף נכיר את החוק הראשון של התרמודינמיקה, שמרחיב את שימור האנרגיה גם לחום, ואת החוק השני, שקובע לאיזה כיוון תהליכים מתרחשים. שני עמודי ״מקרים״ מרכזים 36 מקרים: בראשון מקרים של לחץ, משוואת המצב וגרפים, ובשני מקרים של המודל הקינטי והחוק הראשון. אחרי הקובץ הזה מחכה לכם קובץ של 15 תרגילים באותו נושא.

מה כדאי לדעת קודם? חוקי ניוטון ותרשים כוחות (נושא 2), עבודה ואנרגיה (נושא 3), ובעיקר מתקף ותנע (נושא 4), כי הלחץ של גז נוצר מהתנגשויות. בדוגמה אחת נשתמש במהירות המילוט (נושא 6).

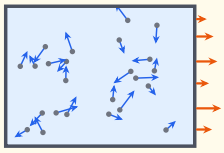
צבעי החצים: מהירות בכחול →, תנע בטורקיז →, כוחות בכתום →, חום בורוד כהה ⇝. הגז מצויר בתכלת, והמולקולות כנקודות אפורות.

נתונים וסימון: קבוע בולצמן $k = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$. T היא טמפרטורה בקלווין, ו־t_C טמפרטורה במעלות צלזיוס. N הוא מספר המולקולות, ו־m המסה של מולקולה אחת. את הלחץ נסמן ב־P: בדף הנוסחאות של הבגרות הוא מסומן ב־p קטנה, וכאן בחרנו ב־P גדולה, כדי לא להתבלבל עם התנע p.

1 הרעיון הגדול: גשם של מולקולות

בגובה העיניים

עמדו מתחת למטרייה כשיורד ברד. כל אבן ברד שפוגעת במטרייה נותנת לה מכה קטנה, כלומר מתקף קטן. כשהאבנים מעטות, מרגישים מכות בודדות. כשאלפי אבנים פוגעות בכל שנייה, המכות מתמזגות, ומרגישים כוח קבוע שדוחף את המטרייה למטה. כך נוצר הלחץ של גז. המולקולות של הגז פוגעות בדפנות של הכלי בלי הפסקה, וכל פגיעה נותנת לדופן מתקף זעיר. באוויר שבחדר נופלות על כל סנטימטר רבוע של קיר כ־3×10^{23} פגיעות בשנייה, ולכן אנחנו מרגישים כוח חלק וקבוע.



כל פגיעה נותנת לדופן מתקף קטן

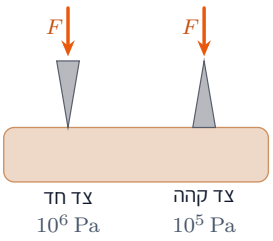
בכל סנטימטר מעוקב של אוויר יש כ־2.5×10^{19} מולקולות, והן נעות במהירויות של מאות מטרים בשנייה. אי אפשר לעקוב אחרי כל אחת מהן, וגם אין צורך. בנושא הזה נתאר גז בשתי רמות:

- **הרמה המקרוסקופית**: גדלים שמודדים במכשירים, כמו לחץ, נפח וטמפרטורה (פרקים 2 עד 6).
- **הרמה המיקרוסקופית**: המולקולות, המסה שלהן והמהירויות שלהן (פרקים 7 עד 10).

המטרה היא לחבר בין השתיים, ולהסביר את מה שמודדים בעזרת חוקי ניוטון שחלים על המולקולות. הרעיון הזה לא התקבל בקלות. דניאל ברנולי הציע אותו כבר ב־1738, אבל רק במחצית השנייה של המאה ה־19 פיתחו אותו קלאוזיוס, מקסוול ובולצמן לתורה שלמה. גם אז היו מדענים חשובים שלא האמינו שמולקולות קיימות, והוויכוח נגמר רק בתחילת המאה ה־20 (פרק 7).

© אור בן שטרית · אינסוף

2 לחץ



לחץ הוא כוח ליחידת שטח. כשכוח F פועל בניצב למשטח ששטחו A, הלחץ על המשטח הוא

$$P=\frac{F}{A} \qquad [\mathrm{Pa}=\mathrm{N/m^2}]$$

יחידת הלחץ נקראת **פסקל**. כדי לפרוס לחם, לוחצים על הסכין כשהצד החד שלה למטה. נניח שלוחצים בכוח של $20\,\mathrm{N}$, והלהב נוגע בלחם לאורך $10\,\mathrm{cm}$. בצד החד רוחב המגע $0.2\,\mathrm{mm}$, השטח $2\times10^{-5}\,\mathrm{m^2}$, והלחץ $10^6\,\mathrm{Pa}$. בצד הקהה, שרוחבו $2\,\mathrm{mm}$, הלחץ קטן פי 10, והסכין כמעט לא חודרת.

יחידות נוספות הן קילופסקל, $1\,\mathrm{kPa}=10^3\,\mathrm{Pa}$, ובר, $1\,\mathrm{bar}=10^5\,\mathrm{Pa}$. לחץ האוויר הממוצע בגובה פני הים נקרא אטמוספרה אחת: $1\,\mathrm{atm}=1.01\times10^5\,\mathrm{Pa}$.

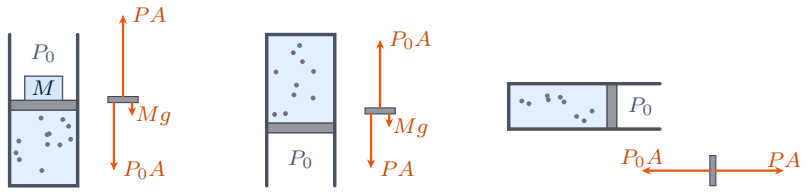
הלחץ של גז בכלי סגור

- הוא פועל **בכל הכיוונים**: על כל קטע של דופן, בניצב לדופן.
- הוא **אחיד** בכל הכלי, כל עוד הגז לא זורם, והמשקל שלו קטן מאוד לעומת הכוחות שהלחץ יוצר. בכלים רגילים זה נכון בקירוב טוב מאוד.
- הוא **תכונה של הגז**, כמו הנפח והטמפרטורה שלו. שלושת הגדלים האלה יחד מתארים את **המצב** של הגז.

אנחנו חיים בתחתית של ים אוויר. בגובה פני הים לחץ האוויר הוא בערך $P_0=1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$: כוח של $10^5\,\mathrm{N}$ על כל מטר רבוע, כמו המשקל של 10 טון, או המשקל של $1\,\mathrm{kg}$ על כל סנטימטר רבוע. למה החלונות לא נשברים, ולמה אנחנו לא נמעכים? כי האוויר דוחף משני הצדדים. על חלון דוחף אוויר גם מבחוץ וגם מבפנים, ובגוף שלנו הלחץ בפנים שווה ללחץ בחוץ. כשמוציאים את האוויר מצד אחד, מגלים כמה הכוח של הצד השני גדול. ב־1654 הוציא אוטו פון גֶריקה את האוויר מכדור שבנוי משני חצאים צמודים, ושתי קבוצות של סוסים לא הצליחו להפריד ביניהם. אילו כל האוויר היה יוצא מכדור שרדיוסו $25\,\mathrm{cm}$, הכוח שמצמיד את החצאים היה $P_0\cdot\pi r^2\approx2\times10^4\,\mathrm{N}$, כמו המשקל של שני טון. (מתברר שהשטח שקובע כאן הוא שטח החתך של הכדור, πr^2.)

לחץ מוחלט ולחץ עודף. מד הלחץ בתחנת דלק מראה בכמה הלחץ בצמיג גדול מלחץ האוויר בחוץ. זה **הלחץ העודף**. כשהמד מראה $2.2\,\mathrm{bar}$, הלחץ בצמיג הוא $P=P_0+2.2\,\mathrm{bar}=3.2\,\mathrm{bar}=3.2\times10^5\,\mathrm{Pa}$. בכל החוקים של הנושא משתמשים ב**לחץ המוחלט**.

גז מתחת לבוכנה. בגליל אנכי סגור מלמטה יש גז, ומעליו בוכנה ששטחה A. הבוכנה נעה בלי חיכוך, ומעליה אוויר בלחץ P_0. המסה של הבוכנה, יחד עם משקולת שמונחת עליה, היא M. כשהבוכנה במנוחה, הכוח השקול עליה אפס (נושא 2). הגז דוחף אותה למעלה בכוח PA. האוויר דוחף אותה למטה בכוח P_0A, וגם המשקל Mg פועל כלפי מטה. לכן $PA=P_0A+Mg$. כשהגליל הפוך, הבוכנה מתחת לגז. האוויר דוחף אותה למעלה ומחזיק גם את המשקל שלה, ולכן הלחץ של הגז קטן מ־P_0. בגליל אופקי המשקל ניצב לגליל, והוא לא משנה את הלחץ.



דוגמה פתורה

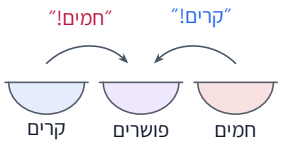
בוכנה ומשקל. בוכנה שמסתה $20\,\mathrm{kg}$ ושטחה $100\,\mathrm{cm^2}=0.01\,\mathrm{m^2}$ סוגרת גז, ובחוץ $P_0=1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$. התוספת של המשקל ללחץ היא $\frac{Mg}{A}=\frac{200}{0.01}=2.0\times10^4\,\mathrm{Pa}$. כשהבוכנה מעל הגז, $P=1.2\times10^5\,\mathrm{Pa}$. בגליל הפוך, $P=0.8\times10^5\,\mathrm{Pa}$.

© אור בן שטרית · אינסוף

בדקו את עצמכם

אישה שמסתה $60\,\mathrm{kg}$ עומדת לרגע על עקב אחד של נעל, ושטח העקב $1\,\mathrm{cm}^2$. פיל שמסתו $5000\,\mathrm{kg}$ עומד על ארבע רגליים, ושטח כל רגל $0.1\,\mathrm{m}^2$. מי לוחץ על הרצפה בלחץ גדול יותר, ופי כמה?

3 טמפרטורה ומדחום



הטמפרטורה מתחילה כתחושה של חם או קר, אבל התחושה מטעה. הכניסו יד אחת למים קרים ויד שנייה למים חמים, ואחרי דקה הכניסו את שתיהן לקערה של מים פושרים. היד שהייתה במים הקרים תרגיש שהמים חמים, והיד שהייתה במים החמים תרגיש שהם קרים. כדי למדוד טמפרטורה צריך מכשיר: **מדחום** (תרמומטר).

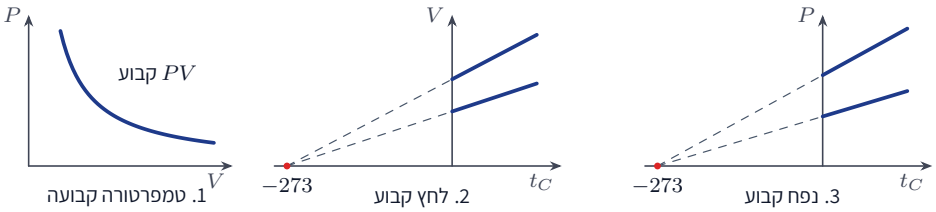
מדחום עובד בזכות עובדה פשוטה: כששני גופים נוגעים זה בזה מספיק זמן, הטמפרטורות שלהם משתוות, והם מגיעים ל**שיווי משקל תרמי**. לכן מדחום שמוחזק בפה מראה, אחרי כמה דקות, את הטמפרטורה של הפה. בעצם המדחום מודד את הטמפרטורה של עצמו, ולכן הוא צריך להיות קטן, כדי שלא ישנה את הטמפרטורה של מה שהוא מודד.

מדחומים רבים מודדים נפח. במדחום כספית או כוהל הנוזל מתפשט כשהוא מתחמם, ועמודת הנוזל בצינור הצר מתארכת. במדחום גז מודדים את הנפח של גז בלחץ קבוע, או את הלחץ שלו בנפח קבוע. כדי לתת מספרים בוחרים שתי נקודות קבועות. בסולם **צלזיוס** $0\,^\circ\mathrm{C}$ היא הטמפרטורה שבה קרח נמס, ו־$100\,^\circ\mathrm{C}$ היא הטמפרטורה שבה מים רותחים בלחץ של אטמוספרה אחת. הבחירה הזו שרירותית: בסולם פרנהייט, למשל, אותן שתי נקודות הן 32 ו־212 מעלות. בפרק 5 נכיר סולם טמפרטורה שאינו שרירותי.

4 שלושה ניסויים בגז

ניקח כמות קבועה של גז בכלי סגור. למצב שלו יש שלושה גדלים: לחץ P, נפח V וטמפרטורה t_C. כדי לגלות את הקשר ביניהם, משאירים אחד מהם קבוע ובודקים איך שני האחרים משתנים יחד.

1. **טמפרטורה קבועה.** לוחצים לאט על הבוכנה של מזרק סגור, ומודדים את הלחץ בחיישן. כשהנפח קטן פי 2, הלחץ גדל פי 2: המכפלה PV נשארת קבועה. זה **חוק בויל** (1662), והגרף של P כפונקציה של V הוא היפרבולה.
2. **לחץ קבוע.** גז בגליל עם בוכנה שנעה בחופשיות. כשמחממים את הגז, הנפח שלו גדל בקצב קבוע עם הטמפרטורה: הגרף של V כפונקציה של t_C הוא קו ישר (שארל וגה־ליסאק).
3. **נפח קבוע.** גז בכלי קשיח. כשמחממים אותו, הלחץ גדל בקצב קבוע עם הטמפרטורה: גם כאן הגרף הוא קו ישר.



ההפתעה הגדולה מגיעה כשממשיכים את הקווים בגרפים 2 ו־3 אל מתחת לטמפרטורות שמדדנו (הקווים המקווקווים). הם פוגשים את ציר הטמפרטורה תמיד באותה נקודה, בערך $-273\,^\circ\mathrm{C}$. זה נכון לכל גז, לכל כמות של גז ולכל לחץ או נפח, כל עוד הגז לא דחוס מדי. בגרפים מצוירים שני קווים: אותו גז בשני לחצים שונים (גרף 2), ובשני נפחים שונים (גרף 3). שלושת הניסויים מתלכדים לנוסחה אחת: בכמות קבועה של גז, הגודל $\frac{PV}{t_C+273}$ נשאר קבוע.

בדקו את עצמכם

במזרק סגור יש $30\,\mathrm{mL}$ של אוויר בלחץ $1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$. דוחפים לאט את הבוכנה, והטמפרטורה לא משתנה. מה יהיה הלחץ כשהנפח יהיה $12\,\mathrm{mL}$?

© אור בן שטרית · אינסוף

5 האפס המוחלט וסולם קלווין

מכיוון שכל הקווים פוגשים את ציר הטמפרטורה באותה נקודה, נוח למדוד את הטמפרטורה ממנה. כך מוגדר **סולם קלווין**:

טמפרטורה מוחלטת

$$T = t_C + 273 \qquad [\mathrm{K}]$$

שינוי של $1\,\mathrm{K}$ שווה לשינוי של $1\,^\circ\mathrm{C}$, ולכן הפרש טמפרטורות זהה בשני הסולמות. היחידה היא K (קלווין), בלי סימן של מעלות. **האפס המוחלט** הוא $0\,\mathrm{K} = -273\,^\circ\mathrm{C}$.

האפס המוחלט הוא הטמפרטורה הנמוכה ביותר האפשרית. בטמפרטורה נמוכה ממנו, הנפח או הלחץ של הגז בגרפים היו צריכים להיות שליליים. בפועל כל גז הופך לנוזל או למוצק לפני שהוא מגיע לשם. במעבדות הגיעו לפחות ממיליארדית של קלווין מעל האפס, אבל לא לאפס עצמו.

בסולם קלווין שלושת הניסויים נעשים פשוטים: בנפח קבוע הלחץ **פרופורציוני** לטמפרטורה, ובלחץ קבוע הנפח פרופורציוני לה. כשהטמפרטורה בקלווין גדלה פי 2, הלחץ בכלי קשיח גדל פי 2. כשכמות הגז קבועה:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

בטמפרטורה קבועה מקבלים מכאן $P_1V_1 = P_2V_2$, בלחץ קבוע $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, ובנפח קבוע $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$.

	$T\,(\mathrm{K})$	$t_C\,(^\circ\mathrm{C})$
האפס המוחלט	0	−273
חנקן נוזלי רותח	77	−196
קרח יבש	195	−78
קרח נמס	273	0
חדר	293	20
גוף האדם	310	37
מים רותחים	373	100
פני השמש	5800	5500

טעות נפוצה

כשהטמפרטורה עולה מ־$20\,^\circ\mathrm{C}$ ל־$40\,^\circ\mathrm{C}$, הלחץ בכלי קשיח **לא** גדל פי 2. בקלווין הטמפרטורה עולה מ־$293\,\mathrm{K}$ ל־$313\,\mathrm{K}$, ולכן הלחץ גדל פי $\frac{313}{293} \approx 1.07$, כלומר בכ־7%. בכל נוסחה של גז מציבים טמפרטורה בקלווין.

בדקו את עצמכם

בקבוק סגור מכיל אוויר ב־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ובלחץ $1.0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$. מה יהיה הלחץ בבקבוק במקפיא, ב־$-18\,^\circ\mathrm{C}$? לאיזו טמפרטורה (במעלות צלזיוס) צריך לחמם בקבוק כזה, כדי שהלחץ בו יגדל פי 2?

6 משוואת המצב של גז אידיאלי

מה קורה ל־$\frac{PV}{T}$ כשמשנים את כמות הגז? דמיינו כלי שמחיצה מחלקת אותו לשני חלקים זהים, ובשניהם אותו גז, באותו לחץ ובאותה טמפרטורה. כשמסירים את המחיצה, מתקבל כלי אחד בנפח כפול, עם אותו לחץ ואותה טמפרטורה. לכן $\frac{PV}{T}$ גדל פי 2: הוא פרופורציוני לכמות הגז, כלומר למספר המולקולות N. מתברר שקבוע הפרופורציה זהה לכל הגזים: לחמצן, להליום, לפחמן דו־חמצני ולכל גז אחר. הקבוע הזה נקרא **קבוע בולצמן**, k.

משוואת המצב של גז אידיאלי

$$PV = NkT \qquad k = 1.38 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$$

P בפסקל, V במטרים מעוקבים, T בקלווין, ו־N הוא מספר המולקולות. גז שמקיים את המשוואה הזו בדיוק נקרא **גז אידיאלי**. זה מודל: גזים אמיתיים, שנקראים גם **גזים ריאליים**, מקיימים אותה רק בקירוב.

מהמשוואה נובעת עובדה מפתיעה: בנפחים שווים של גזים שונים, באותו לחץ ובאותה טמפרטורה, יש אותו מספר של מולקולות. אמדיאו אבוגדרו שיער את זה כבר ב־1811. גזים אמיתיים מתנהגים כמו גז אידיאלי כל עוד הם לא דחוסים מדי, והטמפרטורה שלהם לא קרובה לטמפרטורה שבה הם הופכים לנוזל. האוויר בחדר, למשל, מקיים את המשוואה בדיוק טוב יותר מאלפית. בלחץ גבוה מאוד או בטמפרטורה נמוכה מאוד הסטייה גדלה.

© אור בן שטרית · אינסוף

למי שמכיר מולים מכימיה. כש־n הוא מספר המולים, $N = nN_A$, ו־$N_A = 6.02 \times 10^{23}$ הוא מספר אבוגדרו. אז $PV = nRT$, כאשר $R = N_A k \approx 8.31\,\mathrm{J/(mol \cdot K)}$. מול אחד של גז ב־$0\,^\circ\mathrm{C}$ ובלחץ של אטמוספרה אחת תופס כ־22.4 ליטר. בשאלות של הנושא הזה אפשר להסתדר בלי מולים.

דוגמה פתורה

כמה מולקולות יש בחדר? חדר שמידותיו $5\,\mathrm{m} \times 4\,\mathrm{m} \times 3\,\mathrm{m}$ מלא אוויר ב־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ובלחץ $1.0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$. הנפח $60\,\mathrm{m}^3$, והטמפרטורה $300\,\mathrm{K}$:

$$N = \frac{PV}{kT} = \frac{1.0 \times 10^5 \cdot 60}{1.38 \times 10^{-23} \cdot 300} \approx 1.45 \times 10^{27}$$

בכל מטר מעוקב יש כ־2.4×10^{25} מולקולות. לכל מולקולה "שייך" נפח של כ־$4 \times 10^{-26}\,\mathrm{m}^3$, כלומר קובייה שהצלע שלה כ־$3.5 \times 10^{-9}\,\mathrm{m}$. זה בערך פי 10 מהגודל של מולקולה. המולקולות עצמן תופסות פחות מאלפית מהנפח, ורוב הגז הוא חלל ריק.

שיטה ב־5 צעדים לשאלה על גז

1. מזהים את הגז ואת המצבים שמשווים ביניהם.
2. מחליטים מה קבוע: מספר המולקולות? הנפח? הלחץ? הטמפרטורה?
3. ממירים את הטמפרטורה לקלווין, ולוקחים את הלחץ המוחלט.
4. כשמספר המולקולות קבוע: $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$. כאן הלחץ והנפח יכולים להיות בכל יחידה, כל עוד היא זהה בשני המצבים.
5. כשמבקשים את מספר המולקולות: $PV = NkT$, ורק ביחידות SI. כשמספר המולקולות משתנה ומבקשים יחס, $\frac{PV}{NT}$ קבוע, ואפשר לעבוד בכל יחידות.

דוגמה פתורה

מכל שמתרוקן. מכל של 10 ליטר מכיל חמצן ב־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ובלחץ $5.0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$. משתמשים בחלק מהגז, עד שהלחץ יורד ל־$2.0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$ באותה טמפרטורה. איזה חלק מהמולקולות יצא? הנפח והטמפרטורה לא השתנו, ולכן N פרופורציוני ל־P. נשארו $\frac{2.0}{5.0} = 40\%$ מהמולקולות, ויצאו 60%.

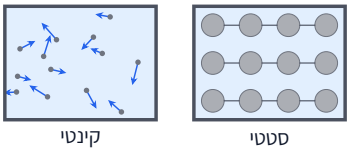
הגרפים של גז אידיאלי. בגרף P–V, עקומה של טמפרטורה קבועה נקראת **איזותרמה**. זו היפרבולה, $P = \frac{NkT}{V}$, וכשהטמפרטורה גבוהה יותר, העקומה רחוקה יותר מהראשית. בגרף V–T בלחץ קבוע ובגרף P–T בנפח קבוע, הגרף הוא קו ישר שיוצא מהראשית. השיפוע שלו הוא $\frac{Nk}{P}$ או $\frac{Nk}{V}$. לכן בגרף V–T קו תלול יותר מתאים ללחץ קטן יותר, ובגרף P–T הוא מתאים לנפח קטן יותר. כל המקרים האלה מופיעים בעמוד ה"מקרים" הבא.

בדקו את עצמכם

כמה מולקולות יש בבלון שנפחו 3.0 ליטר, כשהלחץ בו $1.2 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$ והטמפרטורה $27\,^\circ\mathrm{C}$?

7 מה יש בתוך גז? מודל סטטי ומודל קינטי

משוואת המצב היא חוק ניסויי: היא מתארת מה קורה, אבל לא מסבירה למה. כדי להסביר צריך **מודל**, כלומר תמונה פשוטה של מה שקורה בתוך הגז.



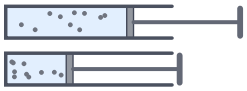
המודל הסטטי. רוברט בויל דמיין גז כאוסף של חלקיקים נחים, שצמודים זה לזה ודוחים זה את זה כמו קפיצים קטנים, או כמו צמר דחוס. המודל מסביר למה גז מתנגד לדחיסה, ולמה הלחץ פועל בכל הכיוונים. אבל הוא נכשל בשאלות אחרות. למה ריח של בושם מתפשט בכל החדר? למה גז ממלא כל כלי, גדול ככל שיהיה? ולמה כל הגזים, עם חלקיקים שונים כל כך, מצייתים לאותה משוואה עם אותו k?

המודל הקינטי. ב־1738 הציע דניאל ברנולי תמונה אחרת: החלקיקים של הגז נעים כל הזמן במהירות, והלחץ נוצר מהפגיעות שלהם בדפנות.

מקרים לחץ, משוואת המצב וגרפים – 18 מקרים

בכל כרטיס: מקרה אחד, המשוואה שלו ומה שכדאי לזכור. כמות הגז קבועה, אלא אם נאמר אחרת. P_0 הוא לחץ האוויר בחוץ.

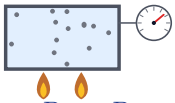
1 מזרק נלחץ לאט



$$P_1V_1 = P_2V_2$$

טמפרטורה קבועה: חצי נפח, לחץ כפול

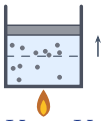
2 כלי קשיח מתחמם



$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

נפח קבוע: הלחץ פרופורציוני ל־T

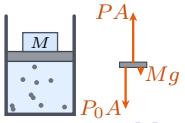
3 בוכנה חופשית, מחממים



$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

לחץ קבוע: הנפח פרופורציוני ל־T

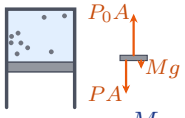
4 משקולת על הבוכנה



$$P = P_0 + \frac{Mg}{A}$$

M: הבוכנה והמשקולת יחד

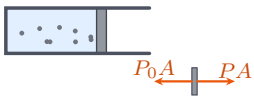
5 הבוכנה מתחת לגז



$$P = P_0 - \frac{Mg}{A}$$

האוויר מלמטה מחזיק את הבוכנה

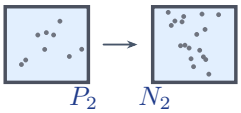
6 גליל אופקי



$$P = P_0$$

המשקל ניצב לציר הגליל

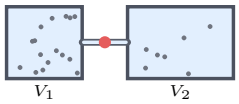
7 מכניסים עוד גז



$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

נפח וטמפרטורה קבועים

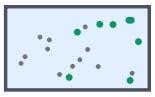
8 פותחים ברז בין שני כלים



$$P\,(V_1 + V_2) = P_1V_1 + P_2V_2$$

באותה טמפרטורה: סופרים מולקולות

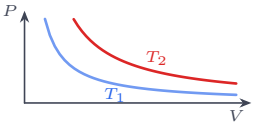
9 תערובת של שני גזים



$$P = P_A + P_B$$

כל גז דוחף כאילו הוא לבד (דלטון)

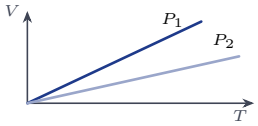
10 איזותרמות בגרף P–V



$$PV = NkT$$

רחוקה יותר מהראשית: חמה יותר

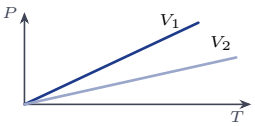
11 גרף V–T בלחץ קבוע



$$V = \frac{Nk}{P}\,T$$

תלול יותר: לחץ קטן יותר

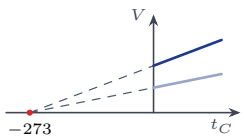
12 גרף P–T בנפח קבוע



$$P = \frac{Nk}{V}\,T$$

תלול יותר: נפח קטן יותר

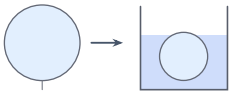
13 גרף V מול t_C



$$T = t_C + 273$$

כל הקווים נפגשים באפס המוחלט

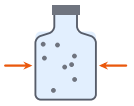
14 בלון הליום בחנקן נוזלי



$$V_2 = V_1 \cdot \tfrac{77}{300} \approx 0.26\,V_1$$

מ־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ל־$77\,\mathrm{K}$, בלחץ קבוע

15 בקבוק סגור: מ־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ל־$-18\,^\circ\mathrm{C}$



$$P_2 = P_1 \cdot \tfrac{255}{300} = 0.85P_1$$

הלחץ בחוץ גדול מהלחץ בפנים

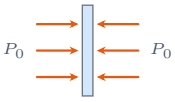
16 מד לחץ בצמיג



$$P = P_0 + \Delta P$$

המד מראה רק את העודף, ΔP

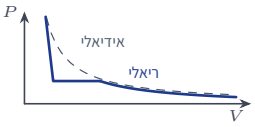
17 אוויר משני צדי חלון



$$F = P_0A = 10^5\,\mathrm{N}$$

על $1\,\mathrm{m}^2$, מכל צד. הכוחות מתקזזים

18 גז ריאלי



$$PV \neq NkT$$

בצפיפות גבוהה, ליד ההפיכה לנוזל

הנחות המודל הקינטי של גז אידיאלי

1. הגז בנוי ממספר עצום של מולקולות. הנפח של המולקולות עצמן זניח לעומת הנפח של הכלי.
2. המולקולות נעות כל הזמן בתנועה אקראית: לכל הכיוונים, במהירויות שונות, בלי כיוון מועדף.
3. אין כוחות בין המולקולות, חוץ מברגע ההתנגשות, שנמשכת זמן זניח. לכן בין התנגשויות כל מולקולה נעה בקו ישר ובמהירות קבועה (הכובד זניח).
4. ההתנגשויות של המולקולות זו בזו ובדפנות הן אלסטיות.
5. חוקי ניוטון חלים על כל מולקולה.

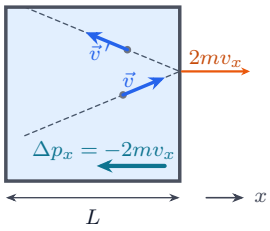
תופעה	מודל סטטי	מודל קינטי
גז מתנגד לדחיסה, והלחץ פועל בכל הכיוונים	מסביר	מסביר
ריח של בושם מתפשט בכל החדר	לא מסביר	מסביר
גז ממלא כל כלי, גדול ככל שיהיה	לא מסביר	מסביר
בכלי קשיח הלחץ גדל כשהטמפרטורה עולה	רק בהנחות נוספות	מסביר
כל הגזים מתנהגים אותו דבר כשמשנים לחץ וטמפרטורה	לא מסביר	מסביר

האם מולקולות באמת קיימות? ב־1827 ראה הבוטנאי רוברט בראון במיקרוסקופ שחלקיקים זעירים, שיצאו מגרגירי אבקה ונמצאים במים, רועדים בלי הפסקה. ב־1905 הסביר אלברט איינשטיין שהרעד נוצר מפגיעות אקראיות של מולקולות המים בחלקיקים. ב־1908 אישר ז׳אן פרן את ההסבר בניסויים, ומדד בעזרתם את מספר אבוגדרו. מאז אין ספק שמולקולות קיימות.

איך יודעים שההתנגשויות אלסטיות? גז בכלי סגור ומבודד שומר על הלחץ ועל הטמפרטורה שלו בלי הגבלת זמן. אילו המולקולות היו מאבדות אנרגיה בכל התנגשות, הן היו מאטות, הגז היה מתקרר, ובסוף כל המולקולות היו שוכבות על רצפת הכלי.

8 הלחץ לפי המודל הקינטי

נחשב את הלחץ מתוך ההנחות של המודל. ניקח קובייה שהצלע שלה L, ובה N מולקולות שהמסה של כל אחת m. נתחיל במולקולה אחת, שרכיבי המהירות שלה v_x, v_y ו־v_z, ונבדוק את הפגיעות שלה בדופן הימנית. הדופן ניצבת לציר x, שמכוון ימינה.



1. **פגיעה אחת.** ההתנגשות אלסטית, והדופן חלקה וכבדה מאוד. לכן הרכיב v_x מתהפך, ושני הרכיבים האחרים לא משתנים. השינוי בתנע של המולקולה הוא $\Delta p_x = -mv_x - mv_x = -2mv_x$. לפי משפט המתקף–תנע (נושא 4), הדופן נתנה למולקולה מתקף $-2mv_x$, ולפי החוק השלישי של ניוטון המולקולה נתנה לדופן מתקף $+2mv_x$.
2. **כל כמה זמן?** עד הפגיעה הבאה באותה דופן, המולקולה עוברת בכיוון x דרך של $2L$, הלוך ושוב, במהירות v_x. זה לוקח $\Delta t = \frac{2L}{v_x}$.
3. **כוח ממוצע.** הכוח הממוצע שהמולקולה מפעילה על הדופן הוא המתקף חלקי הזמן: $\overline{F} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$.
4. **כל המולקולות.** מחברים את הכוחות של כל המולקולות: $F = \frac{m}{L}\left(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \cdots + v_{xN}^2\right) = \frac{Nm}{L}\,\overline{v_x^2}$. כאן $\overline{v_x^2}$ הוא הממוצע של v_x^2 על כל המולקולות.
5. **לחץ.** מחלקים בשטח הדופן, L^2, וזוכרים ש־$L^3 = V$: $P = \frac{F}{L^2} = \frac{Nm\,\overline{v_x^2}}{V}$.
6. **כל הכיוונים שווים.** לכל מולקולה $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. התנועה אקראית ואין כיוון מועדף, ולכן לשלושת הרכיבים אותו ממוצע: $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$.

הלחץ של גז אידיאלי לפי המודל הקינטי

$$\overline{E_k} = \tfrac{1}{2}m\overline{v^2} \qquad P = \frac{1}{3}\frac{N}{V}m\overline{v^2} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\overline{E_k}$$

$\overline{E_k}$ היא האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה, ו־$\frac{N}{V}$ הוא מספר המולקולות ביחידת נפח.

למה המהירות מופיעה בריבוע? יש לזה שתי סיבות. מולקולה מהירה פי 2 פוגעת חזק פי 2, כי המתקף שלה $2mv_x$. היא גם פוגעת לעתים קרובות פי 2, כי הזמן בין פגיעות $\frac{2L}{v_x}$. גם ההתנגשויות בין המולקולות לא משנות את התוצאה. בכל התנגשות כזו נשמרים התנע הכולל והאנרגיה הקינטית הכוללת: מולקולה אחת מאטה והשנייה מאיצה, ובממוצע התנע שמגיע לדופן לא משתנה. גם הצורה של הכלי לא חשובה, ואותה נוסחה נכונה בכל כלי.

דוגמה פתורה

כמה מהר נעות מולקולות האוויר? נגדיר $v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}}$: השורש של הממוצע של ריבועי המהירויות. Nm היא המסה של כל הגז, ולכן $\frac{Nm}{V}$ היא הצפיפות שלו, ρ. מהנוסחה $P = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$ מקבלים $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$. לאוויר בחדר, $P = 1.0 \times 10^5\,\text{Pa}$ ו־$\rho = 1.2\,\text{kg/m}^3$:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1.0 \times 10^5}{1.2}} = 500\,\text{m/s}$$

זה מהיר יותר ממטוס נוסעים. המהירות הזו מאותו סדר גודל כמו מהירות הקול באוויר, כ־$340\,\text{m/s}$, וזה לא מקרי: הקול עובר באוויר בזכות התנועה של המולקולות.

נסו בעצמכם

בהדמיה החינמית Gas Properties של PhET (נפתחת בדפדפן) אפשר להכניס מולקולות לקופסה, לחמם ולקרר אותן, להזיז דופן, ולראות איך הלחץ משתנה. נסו לבדוק את התוצאות של הפרק הזה בעזרתה.

בדקו את עצמכם

בכלי סגור מגדילים פי 2 את המהירות של כל מולקולה. פי כמה גדל הלחץ? ופי כמה גדל הלחץ כשמכניסים לאותו כלי פי 2 מולקולות, והמהירויות לא משתנות?

9 מה הטמפרטורה מודדת?

יש לנו עכשיו שתי משוואות לאותו גז. מהניסוי: $PV = NkT$. מהמודל: $PV = \frac{2}{3}N\overline{E_k}$. אם המודל נכון, אגפי ימין שווים, ולכן $\frac{2}{3}\overline{E_k} = kT$:

טמפרטורה ואנרגיה קינטית ממוצעת

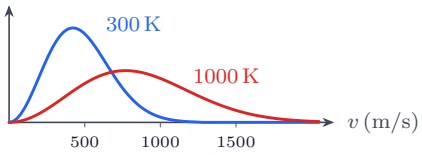
$$\overline{E_k} = \tfrac{3}{2}\,kT \qquad\qquad v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

הטמפרטורה בקלווין היא מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות. מדובר באנרגיה של התנועה ממקום למקום (האנרגיה הקינטית "הטרנסלטורית"). v_{rms} היא מהירות אופיינית של מולקולה, גדולה בפחות מ־10% מהמהירות הממוצעת.

- בטמפרטורת החדר, $300\,\text{K}$, האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה היא $\overline{E_k} = \frac{3}{2} \cdot 1.38 \times 10^{-23} \cdot 300 \approx 6.21 \times 10^{-21}\,\text{J}$, בכל גז.
- באותה טמפרטורה לכל הגזים אותה $\overline{E_k}$. בתערובת של גזים זה קורה בזכות ההתנגשויות: כשמולקולות כבדות וקלות מתנגשות שוב ושוב, האנרגיה עוברת ביניהן, עד שהאנרגיה הקינטית הממוצעת שלהן משתווה. לכן מולקולות כבדות איטיות יותר: v_{rms} פרופורציונית ל־$\frac{1}{\sqrt{m}}$.
- כשהטמפרטורה בקלווין גדלה פי 2, $\overline{E_k}$ גדלה פי 2, ו־v_{rms} גדלה פי $\sqrt{2} \approx 1.41$.
- באפס המוחלט $\overline{E_k} = 0$: לפי המודל, המולקולות עומדות.
- טמפרטורה של גז היא תכונה של הרבה מולקולות יחד, כי היא קשורה לממוצע. לכן אין משמעות לטמפרטורה של מולקולה אחת, ואין טמפרטורה של גז במקום שאין בו מולקולות בכלל.

גז	m (kg)	v_{rms} (m/s)
מימן, H_2	3.32×10^{-27}	1930
הליום, He	6.64×10^{-27}	1370
אדי מים, H_2O	2.99×10^{-26}	645
חנקן, N_2	4.65×10^{-26}	517
חמצן, O_2	5.31×10^{-26}	484
פחמן דו־חמצני, CO_2	7.30×10^{-26}	412

v_{rms} של כמה גזים ב־$300\,\text{K}$.



כמה מולקולות חנקן נעות בכל מהירות

להעשרה: לא לכל המולקולות אותה מהירות. הגרף מראה איך מתחלקות המהירויות של מולקולות חנקן בשתי טמפרטורות (התפלגות מקסוול). השטח מתחת לשני הגרפים שווה, כי מספר המולקולות זהה. בטמפרטורה גבוהה ההתפלגות זזה ימינה ומתרחבת. גם בטמפרטורת החדר יש מולקולות שנעות פי 2 ופי 3 מהר יותר מ־v_{rms}.

דוגמה פתורה

למה לירח אין אטמוספרה? ביום הטמפרטורה על פני הירח מגיעה לכ־$390\,\text{K}$. מולקולת חנקן נעה שם במהירות אופיינית

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1.38 \times 10^{-23} \cdot 390}{4.65 \times 10^{-26}}} \approx 589\,\text{m/s}$$

מהירות המילוט מהירח היא כ־$2.4\,\text{km/s}$ (נושא 6), פי 4 בערך. נראה שזה מספיק כדי שהחנקן לא יברח, אבל זה לא כך. לפי כלל אצבע של אסטרונומים, גרם שמיים שומר על גז במשך מיליארדי שנים רק אם v_{rms} של הגז קטנה משישית ממהירות המילוט. הסיבה היא שחלק מהמולקולות מהירות בהרבה מ־v_{rms}, והן בורחות כל הזמן. ההתנגשויות יוצרות בלי הפסקה מולקולות מהירות חדשות. בירח, שישית ממהירות המילוט היא $400\,\text{m/s}$ בלבד, ולכן הירח לא יכול לשמור על חנקן, וגם לא על הגזים הנפוצים האחרים.

בדקו את עצמכם

לאיזו טמפרטורה (במעלות צלזיוס) צריך לחמם הליום שנמצא ב־$27\,^\circ\text{C}$, כדי ש־v_{rms} של האטומים שלו תגדל פי 2?

10 אנרגיה פנימית

בגז אידיאלי אין כוחות בין המולקולות, ולכן אין ביניהן אנרגיה פוטנציאלית: כל האנרגיה של המולקולות היא אנרגיה קינטית. הסכום של האנרגיות הקינטיות של כל המולקולות נקרא **האנרגיה הפנימית** של הגז, או **האנרגיה התרמית** שלו. בגז **חד־אטומי**, כמו הליום, נאון וארגון, כל מולקולה היא אטום יחיד, וכל האנרגיה הקינטית שלה היא אנרגיה של תנועה ממקום למקום:

אנרגיה פנימית של גז אידיאלי חד־אטומי

$$U = N\,\overline{E_k} = \tfrac{3}{2}NkT = \tfrac{3}{2}PV$$

האנרגיה הפנימית של כמות נתונה של גז תלויה רק בטמפרטורה שלו. היא לא כוללת את התנועה של הכלי כולו: גז בתוך רכבת נוסעת אינו "חם יותר" מגז בתחנה.

דוגמה. בבלון של 5.0 ליטר יש הליום בלחץ $1.0 \times 10^5\,\text{Pa}$. האנרגיה הפנימית שלו היא

$$U = \tfrac{3}{2}PV = \tfrac{3}{2} \cdot 1.0 \times 10^5 \cdot 5.0 \times 10^{-3} = 750\,\text{J}$$

זו האנרגיה הקינטית של רץ שמסתו $60\,\text{kg}$ ומהירותו $5\,\text{m/s}$.

בגז אידיאלי כל האנרגיה הפנימית היא אנרגיה תרמית, כלומר אנרגיה של תנועה אקראית. בחומרים אחרים יש באנרגיה הפנימית גם צורות נוספות:

- במולקולות של שני אטומים, כמו חמצן וחנקן, המולקולות גם מסתובבות. לכן באוויר יש יותר אנרגיה פנימית מ־$\frac{3}{2}NkT$, בערך $\frac{5}{2}NkT$ בטמפרטורת החדר.
- בנוזלים ובמוצקים יש כוחות בין המולקולות, ולכן גם אנרגיה פוטנציאלית. כשקרח נמס, האנרגיה שנכנסת אליו מפרקת קשרים, והטמפרטורה לא עולה עד שכל הקרח נמס.

- אנרגיה כימית, שאגורה בקשרים שבתוך המולקולות ומשתחררת למשל בבעירה, ואנרגיה גרעינית, שאגורה בתוך גרעיני האטומים.

טמפרטורה, אנרגיה פנימית וחום

שלושה מושגים קרובים, שונים זה מזה. **טמפרטורה** היא מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה. **אנרגיה פנימית** היא סכום על כל המולקולות. באמבטיה של מים ב־$40\,^\circ\mathrm{C}$ יש הרבה יותר אנרגיה פנימית מאשר בכוס תה ב־$90\,^\circ\mathrm{C}$, כי יש בה הרבה יותר מולקולות. ובכל זאת, כששופכים את התה לאמבטיה, אנרגיה עוברת מהתה אל המים, ולא להפך: מהטמפרטורה הגבוהה אל הנמוכה. אנרגיה שעוברת בגלל הפרש טמפרטורות נקראת **חום**. חום אינו משהו שיש בגוף, אלא אנרגיה שעוברת מגוף לגוף.

בדקו את עצמכם

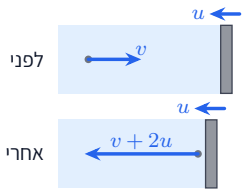
בשני כלים זהים, באותה טמפרטורה ובאותו לחץ, יש בראשון הליום ובשני ארגון. מסת אטום ארגון גדולה פי 10 ממסת אטום הליום. השוו בין שני הגזים: מספר האטומים, האנרגיה הקינטית הממוצעת של אטום, v_{rms} והאנרגיה הפנימית.

11 חום ועבודה: שתי דרכים להעביר אנרגיה

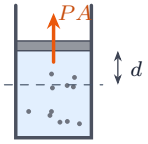
יש שתי דרכים לשנות את האנרגיה הפנימית של גוף:

- **עבודה** היא העברת אנרגיה בתהליך **מקרוסקופי**: כוח פועל לאורך תזוזה שאפשר לראות, למשל בוכנה שזזה, או שני משטחים שמתכככים זה בזה.
- **חום** הוא העברת אנרגיה בתהליך **מיקרוסקופי**. במגע בין גוף חם לגוף קר, המולקולות המהירות של הגוף החם פוגעות במולקולות האיטיות של הגוף הקר, ומוסרות להן אנרגיה. חום עובר מעצמו תמיד מהגוף החם לגוף הקר, עד שהטמפרטורות משתוות. חום עובר גם בקרינה, למשל מהשמש או מתנור לוהט.

לאדם יש ידיים קרות. כשהוא משפשף אותן זו בזו, הטמפרטורה שלהן עולה בגלל עבודה של כוחות חיכוך. כשהוא מחזיק אותן מעל תנור, הטמפרטורה עולה בגלל חום. גם מקדח שקודח בקיר מתחמם. המנוע עושה עבודה, וכוחות החיכוך בין המקדח לקיר הופכים אותה לאנרגיה פנימית של המקדח ושל הקיר. המקדח מתחמם בגלל עבודה, ולא בגלל חום: הקיר קר ממנו. בכל המקרים האלה האנרגיה הפנימית עולה, ומהמצב הסופי של הגוף אי אפשר לדעת באיזו דרך האנרגיה הגיעה אליו.



למה דחיסה מחממת גז? נסתכל על מולקולה שפוגעת בבוכנה, כשהבוכנה נעה לעברה במהירות u. המולקולה מתקרבת לבוכנה במהירות יחסית $v+u$. הבוכנה כבדה מאוד וההתנגשות אלסטית. לכן המהירות היחסית מתהפכת (נושא 4): המולקולה מתרחקת מהבוכנה במהירות יחסית $v+u$. ביחס לגליל המהירות שלה היא $v+2u$. הבוכנה עשתה עבודה על המולקולה, והאנרגיה הקינטית שלה גדלה. כשהבוכנה מתרחקת, המולקולות חוזרות ממנה איטיות יותר, והגז מתקרר. לכן משאבת אופניים מתחממת כשמנפחים צמיג. כשפותחים בקבוק של משקה מוגז, הגז בצוואר הבקבוק מתפשט מהר ומתקרר, ונוצר בו ערפל קטן.



העבודה של גז בלחץ קבוע. גז בלחץ P דוחף בוכנה ששטחה A בכוח $F=PA$. כשהבוכנה זזה מרחק d בכיוון הכוח, הגז עושה עליה עבודה $Fd=PAd$ (נושא 3). המכפלה Ad היא השינוי בנפח, ולכן העבודה שהגז עושה היא $P\,\Delta V$. כשהגז נדחס בלחץ קבוע, ΔV שלילי, והגז עושה עבודה שלילית: הסביבה היא שעושה עבודה על הגז.

בדקו את עצמכם

עבודה או חום? (1) מסמר מתחמם כשמכים בו בפטיש. (2) מים מתחממים בסיר שעומד על אש. (3) האוויר במשאבת אופניים מתחמם כשמנפחים צמיג.

© אור בן שטרית · אינסוף

12 החוק הראשון של התרמודינמיקה

החוק הראשון של התרמודינמיקה

$$\Delta U = Q + W$$

Q הוא החום שהגז **מקבל**, ו־W היא העבודה שהסביבה **עושה על הגז**. זה שימור האנרגיה: השינוי באנרגיה הפנימית שווה לכל האנרגיה שנכנסה לגז, בשתי הדרכים יחד.

	חיובי	שלילי
Q	הגז מקבל חום	הגז מוסר חום
W	הגז נדחס: הסביבה עושה עליו עבודה	הגז מתפשט ועושה עבודה על הסביבה
ΔU	הטמפרטורה של הגז עולה	הטמפרטורה של הגז יורדת

כשגז מתפשט בלחץ קבוע P, העבודה שהסביבה עושה עליו היא $W = -P\,\Delta V$. בגז אידיאלי $P\,\Delta V = Nk\,\Delta T$ בלחץ קבוע, ולכן אפשר לכתוב גם $W = -Nk\,\Delta T$. בכמה ספרים W היא העבודה שהגז עושה, ואז החוק נכתב $\Delta U = Q - W$. זו אותה פיזיקה עם סימן אחר. בדף הנוסחאות של הבגרות כתוב $\Delta U = Q + W$, כמו כאן.

התהליך	W	Q	ΔU
כלי קשיח (נפח קבוע)	0	$\frac{3}{2}Nk\,\Delta T$	Q
בוכנה חופשית (לחץ קבוע)	$-Nk\,\Delta T$	$\frac{5}{2}Nk\,\Delta T$	$\frac{3}{2}Nk\,\Delta T$
לאט, במגע עם סביבה בטמפרטורה קבועה	W	$-W$	0
מהר, או בכלי מבודד	W	≈ 0	W

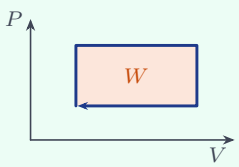
בשתי השורות הראשונות הגז חד־אטומי. בשורה האחרונה החום לא מספיק לעבור: בדחיסה $W > 0$ והגז מתחמם, ובהתפשטות שבה הגז דוחף בוכנה $W < 0$ והגז מתקרר. במנוע דיזל דוחסים את האוויר מהר כל כך, שהוא מתחמם לכמה מאות מעלות, והסולר שמרססים לתוכו נדלק בלי ניצוץ.

דוגמה פתורה

אותו חום, שתי תוצאות. בכלי יש 20 ליטר הליום ב־$27\,^\circ\mathrm{C}$ ובלחץ $1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$. לכן $U = \frac{3}{2}PV = 3000\,\mathrm{J}$, ו־$Nk = \frac{PV}{T} = \frac{2000}{300} \approx 6.67\,\mathrm{J/K}$. נותנים לגז $600\,\mathrm{J}$ חום.

1. **בכלי קשיח:** $\Delta U = Q = 600\,\mathrm{J}$, ולכן $\Delta T = \frac{600}{1.5\cdot 6.67} = 60\,\mathrm{K}$. הטמפרטורה עולה ל־$360\,\mathrm{K}$, והלחץ ל־$1.2\times10^5\,\mathrm{Pa}$.
2. **מתחת לבוכנה חופשית, בלחץ קבוע:** $Q = \frac{5}{2}Nk\,\Delta T$, ולכן $\Delta T = \frac{600}{2.5\cdot 6.67} = 36\,\mathrm{K}$, והטמפרטורה עולה רק ל־$336\,\mathrm{K}$. רק $360\,\mathrm{J}$ מתוך $600\,\mathrm{J}$ מחממים את הגז. השאר, $240\,\mathrm{J}$, הם העבודה שהגז עושה על הבוכנה: $P\,\Delta V = 240\,\mathrm{J}$, ולכן הנפח גדל ב־$2.4$ ליטר.

גרף P–V ועבודה



מכינה העבודה שגז עושה שווה לשטח מתחת לגרף P–V, כמו שהעבודה של כוח היא השטח מתחת לגרף הכוח (נושא 3). בתהליך מחזורי הגז חוזר למצב ההתחלתי, והעבודה הכוללת שהוא עושה היא השטח שהמסלול סוגר. בתהליך בטמפרטורה קבועה העבודה שהגז עושה היא $NkT\ln\frac{V_2}{V_1}$.

בדקו את עצמכם

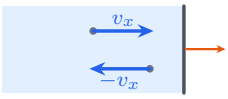
דוחסים גז: הסביבה עושה עליו עבודה של $300\,\mathrm{J}$, ובאותו זמן הוא מוסר לסביבה $100\,\mathrm{J}$ חום. מה השינוי באנרגיה הפנימית שלו? האם הטמפרטורה שלו עולה או יורדת?

© אור בן שטרית · אינסוף

מקרים המודל הקינטי, אנרגיה פנימית והחוק הראשון – 18 מקרים

בכל כרטיס: מקרה אחד, המשוואה המרכזית שלו, ומה שכדאי לזכור. מולקולות באפור, מהירויות בכחול, כוחות בכתום וחום בוורוד כהה. הגז אידיאלי, ובכרטיסים 10 עד 12 הוא גם חד־אטומי.

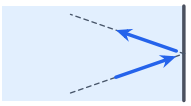
1 פגיעה ניצבת בדופן



$$\Delta p_x = -2mv_x$$

והמולקולה נותנת לדופן מתקף $2mv_x$

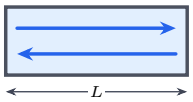
2 פגיעה באלכסון



$$v'_x = -v_x \qquad v'_y = v_y$$

רק הרכיב הניצב לדופן משתנה

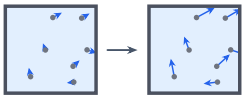
3 פגיעה אחרי פגיעה



$$\overline{F} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

פגיעה באותה דופן כל $2L/v_x$

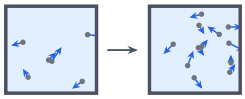
4 כל המהירויות פי 2



$$P' = 4P$$

פגיעה חזקה פי 2, ופי 2 פגיעות בשנייה

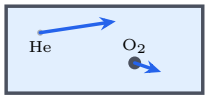
5 פי 2 מולקולות, אותה T



$$P' = 2P$$

פי 2 פגיעות, כל אחת באותה עוצמה

6 הליום וחמצן, אותה T



$$v_{\mathrm{He}} = \sqrt{32/4}\, v_{\mathrm{O_2}} \approx 2.8\, v_{\mathrm{O_2}}$$

אותה $\overline{E_k}$, והאטום הקל מהיר יותר

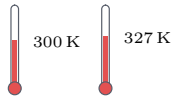
7 טמפרטורה כפולה בקלווין



$$\overline{E_k} \to 2\overline{E_k} \qquad v_{\mathrm{rms}} \to \sqrt{2}\, v_{\mathrm{rms}}$$

האנרגיה פי 2, המהירות פי 1.41

8 מ־27 °C ל־54 °C



$$\overline{E_k}' = \overline{E_k} \cdot \frac{327}{300} \approx 1.09\, \overline{E_k}$$

צלזיוס כפול אינו T כפולה

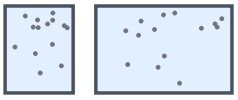
9 מולקולה אחת, או ריק



$$\overline{E_k} = \frac{E_1 + E_2 + \cdots + E_N}{N}$$

אין ממוצע, ולכן אין טמפרטורה של גז

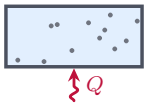
10 אנרגיה פנימית



$$U = \tfrac{3}{2}NkT = \tfrac{3}{2}PV$$

אותו PV, אותה אנרגיה פנימית

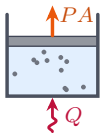
11 חימום בכלי קשיח



$$W = 0 \qquad \Delta U = Q$$

כל החום מחמם את הגז

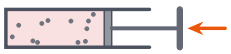
12 חימום מתחת לבוכנה חופשית



$$Q = \tfrac{5}{2}Nk\,\Delta T$$

$\frac{3}{5}$ מהחום מחממים, $\frac{2}{5}$ הופכים לעבודה

13 דחיסה מהירה



$$Q \approx 0 \qquad \Delta U = W > 0$$

הגז מתחמם: משאבת אופניים חמה

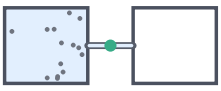
14 התפשטות מהירה



$$Q \approx 0 \qquad \Delta U = W < 0$$

הגז דוחף את הבוכנה ומתקרר

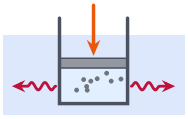
15 התפשטות לריק, בכלי מבודד



$$Q = 0 \qquad W = 0 \qquad \Delta U = 0$$

הטמפרטורה של גז אידיאלי לא משתנה

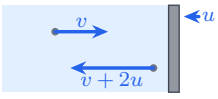
16 דחיסה איטית במים



$$\Delta U = 0 \qquad Q = -W$$

T קבועה: העבודה יוצאת כחום

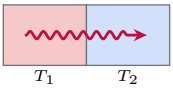
17 בוכנה נעה אל המולקולה



$$v' = v + 2u$$

חוזרת מהירה יותר: דחיסה מחממת

18 חום עובר מחם לקר



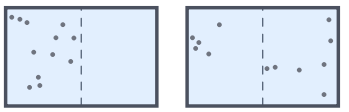
$$T_1 > T_2$$

ההפך לא קורה מעצמו (החוק השני)

© אור בן שטרית · אינסוף

13 החוק השני של התרמודינמיקה

החוק הראשון אומר שהאנרגיה נשמרת בכל תהליך, אבל הוא לא קובע אילו תהליכים יכולים לקרות. כוס תה בטמפרטורת החדר שמתחממת מעצמה עד שהיא רותחת, בזמן שהאוויר בחדר מתקרר, כדור שקופץ פתאום מהרצפה בזמן שהרצפה מתקררת, וכל האוויר בחדר שמתאסף מעצמו בחצי אחד שלו: כל התהליכים האלה שומרים על האנרגיה, ובכל זאת אף אחד לא ראה אותם קורים. **החוק השני של התרמודינמיקה** מבטא את העובדה שלא כל תהליך שמקיים את שימור האנרגיה מתרחש. ניסוח אחד שלו: **חום עובר מעצמו רק מגוף חם לגוף קר**. ניסוח אחר: אי אפשר לבנות מכונה שהופכת חום לעבודה במלואו, שוב ושוב.


מפוזרות: כמעט תמיד כולן בחצי אחד: נדיר

למה זה כך? עניין של סיכוי. כל מולקולה בקופסה נמצאת בכל רגע בחצי השמאלי או בחצי הימני, בסיכוי שווה. הסיכוי שמולקולה אחת נמצאת בחצי השמאלי הוא $\frac{1}{2}$. הסיכוי ששתיים נמצאות שם יחד הוא $\frac{1}{4}$, ולכן N מולקולות $\left(\frac{1}{2}\right)^N$. כשיש 10 מולקולות, הסיכוי הוא כ־10^{-3}. כשיש 100, הוא כ־8×10^{-31}. בחדר יש כ־10^{27} מולקולות, ולכן זה פשוט לא קורה. מצבים "מסודרים" נדירים מאוד, ותהליכים מתקדמים כמעט תמיד לכיוון המצבים השכיחים. מאותה סיבה חום זורם מהחם אל הקר, ולא להפך.

אם האנרגיה נשמרת, למה צריך לחסוך באנרגיה? כי אנרגיה שהתפזרה כחום בטמפרטורה נמוכה, למשל החום של הבלמים או של מנוע המכונית, כמעט לא שימושית. אי אפשר לאסוף אותה בחזרה ולהשתמש בה שוב. לכן, אף על פי שהאנרגיה נשמרת, צריך לחפש כל הזמן "מקורות אנרגיה" חדשים.

מכונות חום

מכונה מכונת חום, כמו מנוע של מכונית או תחנת כוח, מקבלת חום Q_1 ממקור חם, עושה עבודה W, ומוסרת חום Q_2 לסביבה הקרה. לפי שימור האנרגיה, $W=Q_1-Q_2$. הנצילות שלה, $\eta=\frac{W}{Q_1}$, תמיד קטנה מ־1. לפי החוק השני, הנצילות הגבוהה ביותר האפשרית בין טמפרטורות T_1 ו־T_2 (בקלווין, $T_1>T_2$) היא $1-\frac{T_2}{T_1}$. בין $800\,\mathrm{K}$ ל־$300\,\mathrm{K}$ זה 62.5%, ומנוע של מכונית מגיע בפועל לכ־25% עד 30%.

בדקו את עצמכם

בקופסה יש 3 מולקולות בלבד. מה הסיכוי שברגע מסוים כל השלוש נמצאות בחצי השמאלי של הקופסה?

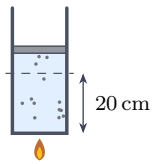
14 שאלות משולבות: גז ומכניקה

בשאלות רבות הגז סגור מתחת לבוכנה, ואז נפגשים כמה נושאים. שלושה צעדים מסדרים את הפתרון:

1. כוחות על הבוכנה — הלחץ של הגז (נושא 2)
2. משוואת המצב — נפח, טמפרטורה או N
3. אנרגיה — $\Delta U=Q+W$ (נושא 3)

דוגמה פתורה

מחממים גז מתחת לבוכנה. בגליל אנכי ששטח החתך שלו $50\,\mathrm{cm}^2$ יש הליום מתחת לבוכנה שמסתה $10\,\mathrm{kg}$, שנעה בלי חיכוך. בחוץ $P_0=1.0\times10^5\,\mathrm{Pa}$. בהתחלה הבוכנה בגובה $20\,\mathrm{cm}$ מעל תחתית הגליל, והטמפרטורה $27\,^\circ\mathrm{C}$. מחממים את הגז לאט עד $127\,^\circ\mathrm{C}$.



1. **כוחות:** $P=P_0+\frac{Mg}{A}=1.0\times10^5+\frac{100}{5\times10^{-3}}=1.2\times10^5\,\mathrm{Pa}$, והלחץ לא משתנה בזמן החימום.
2. **משוואת המצב:** בלחץ קבוע הנפח פרופורציוני ל־T, ולכן הגובה גדל פי $\frac{400}{300}$, ל־$26.7\,\mathrm{cm}$.
3. **אנרגיה:** הגז עושה עבודה $P\,\Delta V=1.2\times10^5\cdot5\times10^{-3}\cdot0.0667=40\,\mathrm{J}$. האנרגיה הפנימית גדלה ב־$\frac{3}{2}P\,\Delta V=60\,\mathrm{J}$, ולכן הגז קיבל $Q=100\,\mathrm{J}$ חום.

לאן הלכה העבודה של הגז? $6.7\,\mathrm{J}$ הלכו להרמת הבוכנה ($Mg\,\Delta h$), ו־$33.3\,\mathrm{J}$ לדחיפת האוויר שמעל הבוכנה ($P_0A\,\Delta h$). יחד: $40\,\mathrm{J}$.

15 עשרה טיפים שחוסכים נקודות

1. תמיד קלווין. בכל נוסחה של גז מציבים $T = t_C + 273$. רק בהפרש טמפרטורות אפשר להשתמש גם במעלות צלזיוס.

2. לחץ מוחלט. מד לחץ מראה בדרך כלל את הלחץ העודף. מוסיפים את P_0 לפני שמציבים.

3. קודם מחליטים מה קבוע. כשמספר המולקולות קבוע: $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$, ואפשר להשאיר ליטרים או bar, כל עוד היחידות זהות בשני המצבים.

4. סופרים מולקולות. כשמחברים כלים או מערבבים גזים, המולקולות נשמרות: $N = N_1 + N_2$. באותה טמפרטורה: $PV = P_1V_1 + P_2V_2$.

5. בוכנה? תרשים כוחות. הלחץ של גז שסגור בבוכנה נקבע מהכוחות עליה: $P = P_0 + \frac{Mg}{A}$ כשהגז מתחת לבוכנה, ו־$P = P_0 - \frac{Mg}{A}$ כשהוא מעליה.

6. המהירות בריבוע. $P = \frac{1}{3}\frac{N}{V}m\overline{v^2}$: מהירות כפולה נותנת לחץ פי 4, ופי 2 מולקולות באותו נפח נותנות לחץ פי 2.

7. אותה טמפרטורה, אותה $\overline{E_k}$. $\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$ לכל גז. המהירות תלויה גם במסה: $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$.

8. הדרך הקצרה ל־U. בגז חד־אטומי $U = \frac{3}{2}PV$. לא צריך לחשב קודם את N ואת T.

9. סימנים בחוק הראשון. $Q > 0$ כשהגז מקבל חום. $W > 0$ כשהגז נדחס, ובהתפשטות בלחץ קבוע $W = -P\,\Delta V$.

10. נפח קבוע מול לחץ קבוע. בגז חד־אטומי: בנפח קבוע $Q = \frac{3}{2}Nk\,\Delta T$, ובלחץ קבוע $Q = \frac{5}{2}Nk\,\Delta T$, כי חלק מהחום הופך לעבודה.

16 טעויות נפוצות

שמונה טעויות שחוזרות בכל מבחן

1. מציבים מעלות צלזיוס בנוסחאות של גז, או חושבים שטמפרטורה כפולה במעלות צלזיוס היא טמפרטורה כפולה.
2. מציבים את הלחץ שמד הלחץ מראה (הלחץ העודף) במקום הלחץ המוחלט.
3. מציבים ב־$PV = NkT$ ליטרים או kPa ומקבלים מספר מולקולות שגוי. כאן צריך יחידות SI.
4. חושבים שבאותה טמפרטורה למולקולות כבדות יש יותר אנרגיה קינטית, או שלכל המולקולות של גז אותה מהירות.
5. מבלבלים בין חום, טמפרטורה ואנרגיה פנימית, למשל "יש בגוף הרבה חום".
6. טועים בסימן של W בחוק הראשון, ומציבים בו את העבודה שהגז עושה עם סימן פלוס.
7. שוכחים שבחימום מתחת לבוכנה חופשית חלק מהחום הופך לעבודה, וכותבים $\Delta U = Q$.
8. חושבים שדחיסה תמיד מחממת את הגז. בדחיסה איטית בכלי שמוליך חום הטמפרטורה נשארת קבועה, והגז מוסר חום לסביבה.

17 תשובות לתיבות "בדקו את עצמכם"

- **פרק 2:** העקב: $P = \frac{600}{10^{-4}} = 6.0 \times 10^6$ Pa. הפיל: $P = \frac{5\times10^4}{0.4} = 1.25 \times 10^5$ Pa. העקב לוחץ חזק פי 48.
- **פרק 4:** $P = 1.0 \times 10^5 \cdot \frac{30}{12} = 2.5 \times 10^5$ Pa.
- **פרק 5:** $P = 1.0 \times 10^5 \cdot \frac{255}{300} = 8.5 \times 10^4$ Pa. לחץ כפול דורש $T = 600$ K, כלומר $327\,^\circ$C.
- **פרק 6:** $N = \frac{1.2\times10^5 \cdot 3.0\times10^{-3}}{1.38\times10^{-23}\cdot 300} \approx 8.70 \times 10^{22}$.
- **פרק 8:** הלחץ גדל פי 4. במקרה השני הלחץ גדל פי 2.
- **פרק 9:** v_{rms} פרופורציונית ל־$\sqrt{T}$, ולכן צריך $T = 4 \cdot 300 = 1200$ K, כלומר $927\,^\circ$C.
- **פרק 10:** אותו מספר אטומים ($N = \frac{PV}{kT}$), אותה אנרגיה קינטית ממוצעת לאטום ואותה אנרגיה פנימית ($U = \frac{3}{2}PV$). v_{rms} של ההליום גדולה פי $\sqrt{10} \approx 3.16$.

© אור בן שטרית · אינסוף

- **פרק 11:** (1) עבודה, (2) חום, (3) עבודה.
- **פרק 12:** $\Delta U = Q + W = -100 + 300 = +200\,\text{J}$. האנרגיה הפנימית גדלה, ולכן הטמפרטורה עולה.
- **פרק 13:** $\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$.

ומה עכשיו? עברו לקובץ התרגילים של הנושא: 15 שאלות, מהבסיס ועד שאלות אתגר, עם תשובות סופיות בסוף. זה הנושא האחרון בסדרת המכניקה. הקובץ הבא בסדרה הוא בונוס להעמקה: סטטיקה של גוף קשיח.

18 דף הנוסחאות של הנושא

גז אידיאלי בעמוד אחד

לחץ	$P = \frac{F}{A}$	$1\,\text{Pa} = 1\,\text{N/m}^2$ $\quad P_0 \approx 1.0 \times 10^5\,\text{Pa}$
לחץ מוחלט	P_0 ועוד הלחץ העודף, שמד הלחץ מראה	
בוכנה בשיווי משקל	$P = P_0 + \frac{Mg}{A}$ כשהבוכנה מעל הגז אנכי, בלי חיכוך)	$P = P_0 - \frac{Mg}{A}$ כשהיא מתחת לגז (גליל
טמפרטורה	$T = t_C + 273$ $\quad \Delta T = \Delta t_C$	האפס המוחלט: $0\,\text{K} = -273\,^\circ\text{C}$
כמות גז קבועה	$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$	T קבועה: $P_1V_1 = P_2V_2$
משוואת המצב	$PV = NkT$ $\quad k = 1.38 \times 10^{-23}\,\text{J/K}$	(עם מולים: $PV = nRT$)
הלחץ במודל הקינטי	$P = \frac{1}{3}\frac{N}{V}m\overline{v^2} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\overline{E_k}$	
טמפרטורה ואנרגיה	$\overline{E_k} = \frac{3}{2}kT$ $\quad v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$	
אנרגיה פנימית	$U = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}PV$ (גז אידיאלי חד־אטומי)	
עבודה בלחץ קבוע	הגז עושה $P\,\Delta V$, והסביבה עושה על הגז $W = -P\,\Delta V$	
החוק הראשון	$\Delta U = Q + W$ $\quad Q$ החום שהגז מקבל, W העבודה שעושים על הגז	
תהליכים	נפח קבוע: $\Delta U = Q$ $\quad$ לחץ קבוע (חד־אטומי): $Q = \frac{5}{2}Nk\,\Delta T$	
	טמפרטורה קבועה: $Q = -W$ $\quad$ כלי מבודד או תהליך מהיר: $\Delta U = W$	
החוק השני	חום עובר מעצמו רק מגוף חם לגוף קר	

© 2026 אור בן שטרית · אינסוף. כל הזכויות שמורות.
מותר להדפיס ולהפיץ את הקובץ בשלמותו ובחינם לצורכי לימוד. אסור להעתיק ממנו תרגילים או איורים לחומרים אחרים, לשנות אותו או להשתמש בו למטרות מסחריות בלי אישור בכתב.
הקובץ נכתב בידי אינסוף ואינו פרסום רשמי של משרד החינוך או של גוף אחר.